

К оценке теплосодержания Мирового океана по спутниковым данным о температуре поверхностного слоя воды

В.Н. Малинин, С.М. Гордеева, Н.И. Глок

Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)

Санкт-Петербург, Россия

E-mails: malinin@rshu.ru, gordeeva@rshu.ru

Обсуждается межгодовая изменчивость теплосодержания Мирового океана (ТСМО) с середины XX столетия по настоящее время. Средний тренд ТСМО составляет $0,22 \times 10^{22}$ Дж/год и описывает 75% дисперсии исходного ряда. По данным реанализа и спутников о температуре поверхности океана построены статистические модели, с высокой точностью описывающие изменения ТСМО. Показано, что начиная с 2008 г. отмечается некоторая стабилизация в колебаниях ТСМО.

Ключевые слова: теплосодержание океана, температура поверхности океана, статистические модели, охлаждение океана.

Теплосодержание Мирового океана является важнейшим фактором изменений глобального климата, так как имеет высокую теплоемкость и инерционность. В течение последних 50 лет наблюдается его постоянный рост, вследствие чего происходит увеличение теплосодержания Земли. Так, за период 1955–1998 гг. оно на 84% было обеспечено именно Мировым океаном (Levitus et al., 2005). Теплосодержание Мирового океана практически полностью определяет стерические колебания уровня Мирового океана, вклад которых в формирование тренда глобального уровня может составлять 15–50% в зависимости от интервала временного осреднения (IPCC, 2007).

Несмотря на большую значимость исследований, теплосодержание Мирового океана (ТСМО) оценить весьма сложно, особенно за длительный период времени, так как необходимые для расчета данные о глубоководной температуре для многих районов океана просто отсутствуют. Кроме того, следует отметить, что число наблюдений менялось во времени; причем год от года изменения могли достигать 50%. В среднем отмечался постепенный рост числа наблюдений. Так, в начале 50-х годов прошлого столетия оно составляло $\sim 0,5 \times 10^5$, в начале 80-х $\sim 10^5$, в начале XXI в. оно достигло $\sim 1,5 \times 10^5$ наблюдений (Ishii et al., 2006). Хотя число глубоководных наблюдений возросло в 3 раза, для многих районов океана, особенно в южном полушарии, их по-прежнему недостаточно. Поэтому большая пространственно-временная неоднородность данных о температуре в глубинных слоях океана приводит к значительной неопределенности получаемых оценок теплосодержания.

В настоящее время имеется несколько длительных откорректированных временных рядов аномалий ТСМО (Ishii et al., 2009; Gouretski, Reseghetti, 2010; Domingues et al., 2008; Wijffels et al., 2008; Levitus et al., 2012). Расхождения между ними весьма существенны, особенно в 70-е годы прошлого столетия, когда были выявлены систематические расхождения между значениями температуры, полученной обрывными термозондами (ХВТ) и СТД-зондами (Conductivity-Temperature-Depth). Поэтому для анализа межгодовых колебаний теплосодержания нами рассматривается не каждый ряд в отдельности, а средний

арифметический из пяти рядов аномалий ТСМО – по данным (Ishii et al., 2009; Gouretski, Reseghetti, 2010; Domingues et al., 2008; Wijffels et al., 2008), а также (Levitus et al., 2012) с сайта (http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/). В этом случае происходит сглаживание (нивелирование) случайных ошибок, в результате чего более ярко проявляются наиболее важные крупномасштабные закономерности, присущие рассматриваемому процессу.

На *рис. 1* приводится усредненная кривая аномалий ТСМО. На этом же рисунке в виде вертикальных линий приведены максимальные отклонения от среднего значения для каждого года, которые можно рассматривать как оценку неопределенности значений аномалий теплосодержания.

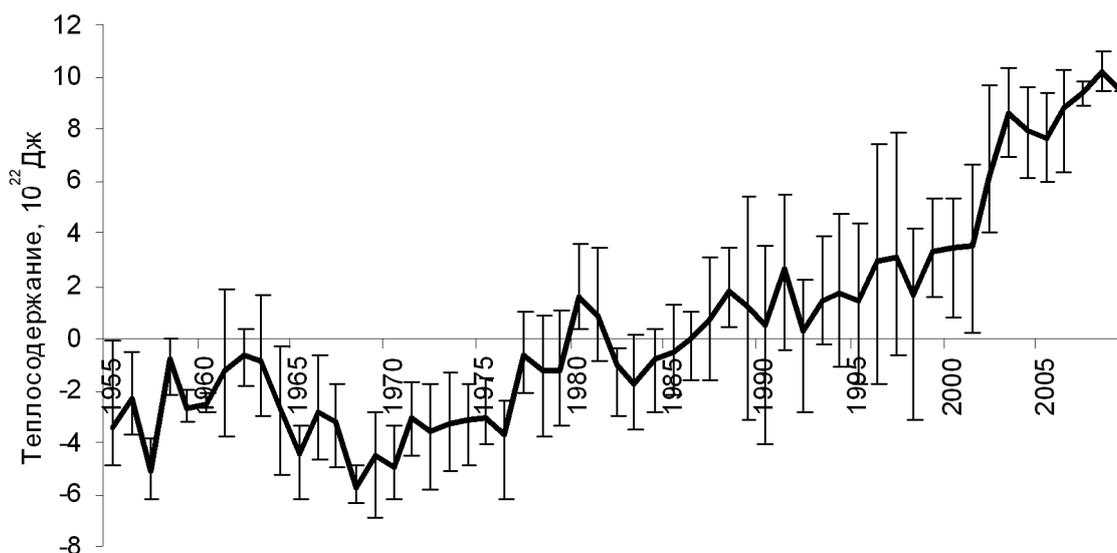


Рис. 1. Межгодовой ход аномалий теплосодержания Мирового океана в слое 0–700 м, усредненных по данным авторов (Ishii et al., 2009; Gouretski, Reseghetti, 2010; Domingues et al., 2008; Wijffels et al., 2008; Levitus et al., 2012) за период 1955–2009 гг. Вертикальные линии – максимальные отклонения аномалий теплосодержания для каждого года

Осредненному ряду аномалий ТСМО свойствен отчетливый линейный тренд ($Tr = 0,22 \times 10^{22}$ Дж/год), описывающий 75% дисперсии исходного ряда. Однако на фоне основного тренда можно выделить промежутки времени, где изменения аномалий теплосодержания имеют иной характер. В частности, в течение 1955–1975 гг. тренд вообще отсутствует, а в XXI столетии он заметно усиливается.

Теплосодержание океана и атмосферы представляют собой единую тепловую систему; причем изменения в одной из этих сфер неминуемо приводят к соответствующим изменениям в другой. Согласованный характер межгодовых колебаний аномалий ТСМО с глобальными значениями аномалий температуры поверхности океана ΔTPO_{glob} (HadSST) и приповерхностной температуры воздуха ΔTB_{glob} (CRUTEM4) (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>) отчетливо виден из *табл. 1*, в которой представлены выборочные коэффициенты корреляции между указанными временными рядами до и после исключения из них линейного тренда. Действительно, синхронная корреляция ТСМО с ΔTPO_{glob} и с ΔTB_{glob} остается значимой (5%-й уровень значимости $r_{кр} = 0,26$) даже после исключения

из временных рядов тренда. При запаздывании ТСМО на один год (сдвиг $\tau = -1$) по отношению к ΔTPO_{glob} и ΔTV_{glob} корреляция существенно выше, чем при запаздывании этих рядов относительно ТСМО, что представляется достаточно очевидным, учитывая значительно более высокую инерционность изменений ТСМО.

Таблица 1. Оценки выборочных коэффициентов корреляции между временными рядами ТСМО, ΔTPO_{glob} и ΔTV_{glob} за период 1955–2009 гг. до и после исключения из них линейного тренда (сдвиг $\tau = -1$ означает запаздывание ТСМО относительно ΔTPO_{glob} и ΔTV_{glob} и ΔTV_{glob} относительно ΔTPO_{glob})

Сдвиг τ в годах	Временные ряды в отклонениях от тренда			Исходные временные ряды		
	ТСМО и ΔTPO_{glob}	ТСМО и ΔTV_{glob}	ΔTV_{glob} и ΔTPO_{glob}	ТСМО и ΔTPO_{glob}	ТСМО и ΔTV_{glob}	ΔTV_{glob} и ΔTPO_{glob}
-1	0,43	0,52	0,48	0,86	0,87	0,87
0	0,36	0,47	0,85	0,84	0,86	0,96
1	0,31	0,38	0,24	0,83	0,84	0,81

Учитывая значительную трудоемкость обработки глубоководных данных, их разнородность и необходимость коррекции (единой методики которой не существует), актуальной является задача определения косвенных оценок теплосодержания Мирового океана по имеющимся и доступным данным. Поскольку изменения теплосодержания обусловлены главным образом поступлением тепла через поверхность океана и дальнейшим его перераспределением по всей толще океана в течение длительного времени, постольку принципиально возможно построение статистической модели ТСМО на основе данных о температуре поверхности океана.

В качестве входной информации можно использовать глобальные гидрометеорологические архивы реанализа или базы данных спутниковых наблюдений за ТПО в среднегодовом усреднении. В работе (Глок, Малинин, 2013) построена статистическая модель теплосодержания Мирового океана по данным о ТПО в узлах двухградусной сетки, полученным из архива реанализа NOAA NCDC ERSST (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/ersst/v3b/>) за период 1968-2009 гг., в котором спутниковые данные по ТПО не используются. С этой целью использовалась многомерная линейная регрессия с пошаговым включением переменных. Оптимальная модель теплосодержания, содержащая семь предикторов, имеет коэффициент детерминации, равный $R^2 = 0,88$ и стандартную ошибку $\sigma_y = 0,6 \times 10^{22}$ Дж (табл. 2), что значительно меньше стандартного отклонения исходного временного ряда аномалий теплосодержания Мирового океана.

На рис. 2 приводится сопоставление фактических и вычисленных по статистической модели значений теплосодержания Мирового океана. Расчет теплосодержания с 2005 г. осуществлялся по независимым данным о ТПО, т.е. не используемым для оценки коэффициентов модели. Нетрудно видеть, что в течение всех пяти лет (2005–2009 гг.) расхождения между фактическими и вычисленными по модели значениями теплосодержания малы и носят случайный характер. При этом стандартная ошибка «спрогнозированных» значений меньше стандартной ошибки исходной выборки.

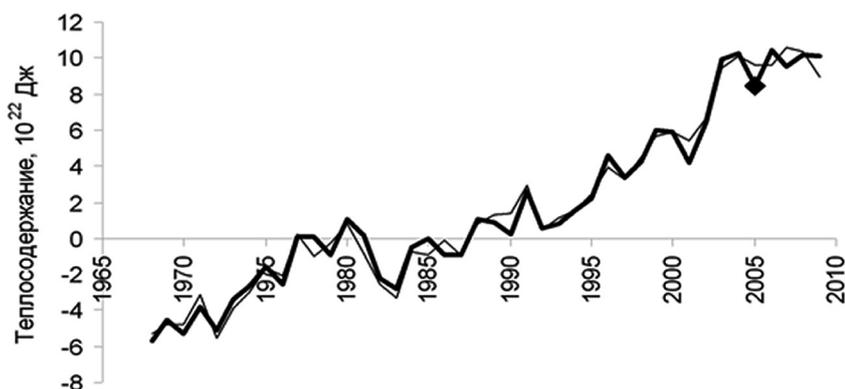


Рис. 2. Временной ход аномалий теплосодержания Мирового океана по данным (Глок, Малинин, 2013). Толстая кривая – исходные значения аномалий теплосодержания, тонкая кривая – вычисленные по статистической модели значения аномалий. Квадрат – начало расчета аномалий теплосодержания по независимым данным о ТПО

Таблица 2. Оценки параметров статистических моделей расчета аномалий ТСМО по данным различных глобальных архивов аномалий температуры поверхности океана

Параметр модели	Архив реанализа ERSST (1968–2004 гг.)	Спутниковый архив OISSTv.2 (1982–2008 гг.)	
		Модель (1)	Модель (2)
Коэффициент детерминации	0,88	0,81	0,94
Стандартная ошибка модели, $\times 10^{22}$ Дж	0,60	1,62	0,90
Число переменных	7	1	7

Итак, статистическая модель на основе данных всего лишь семи двухградусных квадратов ТПО обеспечивает восстановление межгодовых колебаний аномалий теплосодержания Мирового океана с ошибкой, меньшей стандартного отклонения исходного временного ряда аномалий теплосодержания.

Хотя спутниковые данные о ТПО имеют короткую (с 1982 г.) продолжительность наблюдений, их важным достоинством является однородность временных рядов и высокая оперативность получения. На рис. 3 приводится сравнение данных о глобальной ТПО из архива реанализа NOAA NCDC ERSST, в котором спутниковая информация не используется, и спутникового архива NOAA NCDC OISSTv.2 за период 1982–2011 гг. в годовом усреднении. Нетрудно видеть, что между указанными временными рядами отмечается хорошее соответствие; при этом до 2005 г. наблюдался рост ТПО, а затем вплоть до 2011 г. отмечается уже ее снижение. Статистическая связь колебаний ТПО характеризуется коэффициентом корреляции $r = 0,94$. В то же время между этими временными рядами отмечается систематическое расхождение, свидетельствующее о занижении спутниковых данных о глобальной ТПО в среднем на $0,14^\circ\text{C}$. Возможные причины такого занижения обсуждаются в работе (Reynolds et al., 2007).

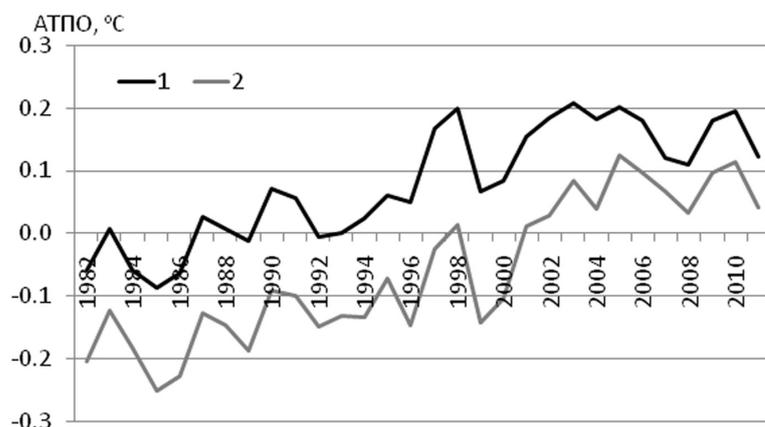


Рис. 3. Аномалии глобальной ТПО по архиву реанализа NOAA NCDC ERSST (линия 1) и спутникового архива NOAA NCDC OISSTv.2 (линия 2)

Оценка связи аномалий ТСМО с глобальными рядами ТПО из этих архивов за период 1982–2009 гг. показала более высокий уровень корреляции со спутниковыми данными, причем максимальная корреляция отмечается при запаздывании теплосодержания на 1 год ($r = 0,90$), а на сдвигах 0 и 2 года она равна 0,87 и 0,86, соответственно. Это позволяет построить простую линейную прогностическую модель теплосодержания Мирового океана с заблаговременностью 1 год, которая имеет вид:

$$\Delta T_{\text{СМО}_i} = b_0 + b_1 \Delta T_{\text{ПО}_{\text{glob}(i-1)}} \quad (1)$$

Среднеквадратическая ошибка модели составляет $\sigma_y = 1,62 \times 10^{22}$ Дж (табл. 2). Сопоставление вычисленных по модели и фактических значений теплосодержания Мирового океана приводится на рис. 4. Несмотря на значительные абсолютные ошибки в отдельные годы, модель в основном воспроизводит основную тенденцию изменения теплосодержания, что позволяет на основании независимых расчетов с 2009 по 2012 г. предположить, что после 2008 г. теплосодержание Мирового океана становится относительно стационарным.

Очевидно, при использовании данных о ТПО в узлах географической сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ архива NOAA NCDC OISSTv.2 может быть построена более точная модель оценки теплосодержания Мирового океана вида:

$$\Delta T_{\text{СМО}} = f(\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_m), \quad (2)$$

где ΔT_i – аномалии ТПО в узлах сетки, m – количество предикторов.

Общее число узлов данной сетки составило 508 178. Построение полной модели такой размерности лишено смысла, поэтому главной задачей является отбор наиболее эффективных предикторов, описывающих теплосодержание Мирового океана с максимальной точностью. Для этой цели использовалась многомерная линейная регрессия с пошаговым включением переменных (Малинин, Гордеева, 2003). В результате расчетов было получено, что оптимальная модель теплосодержания, результаты расчетов по которой представлены на рис. 4, содержит менее 10 предикторов, расположенных в разных частях океана, имеет коэффициент детерминации, равный $R^2 = 0,94$ и стандартную ошибку $\sigma_y = 0,9 \times 10^{22}$ Дж, что значительно меньше стандартного отклонения исходного временного ряда аномалий ТСМО.

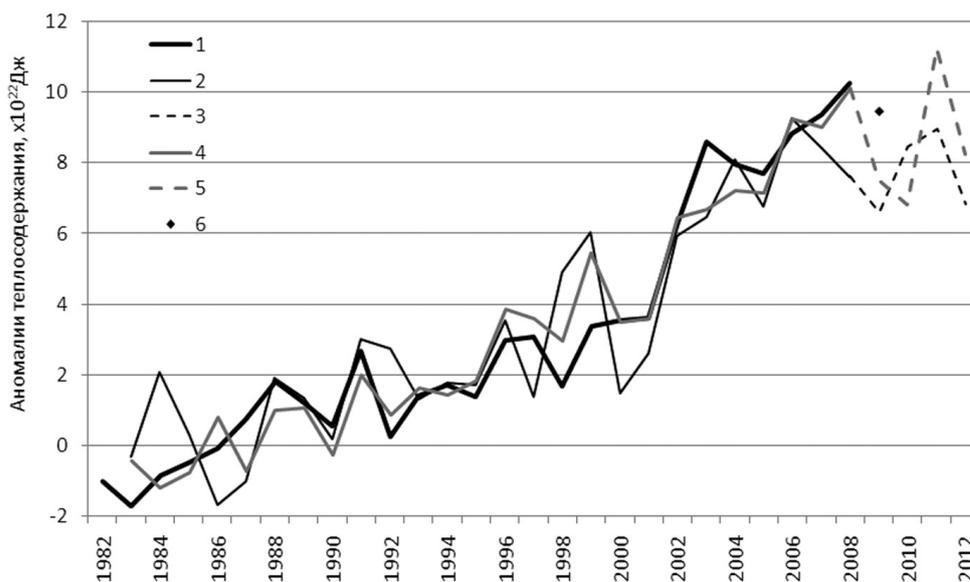


Рис. 4. Сопоставление фактических значений аномалий теплосодержания Мирового океана (линия 1) и вычисленных по моделям (1) и (2) (линии 2 и 4, соответственно). Пунктиром показаны независимые расчеты по моделям (1) и (2) (линии 3 и 5, соответственно); маркером (6) отмечено фактическое независимое значение теплосодержания

Результаты, полученные по моделям, оказались похожими и подтверждают ранее сделанный авторами вывод о начавшемся в последние годы охлаждении толщи Мирового океана и, как следствие, о замедлении роста стерической компоненты уровня Мирового океана (Малинин и др., 2010). Возможно, в ближайшие годы станет ясно, носит ли охлаждение океана временный характер или это долговременная тенденция.

Итак, спутниковые данные о ТПО являются репрезентативными для построения статистических моделей теплосодержания Мирового океана. Их важными преимуществами являются простота, доступность и отсутствие необходимости в использовании глубоководных данных о температуре воды. Кроме того, статистическая модель (1) дает возможность приближенного прогноза аномалий ТСМО с заблаговременностью 1 год.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете при финансовой поддержке гранта Правительства РФ (Договор № 11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.

Литература

1. Глок Н.И., Малинин В.Н. Изменения теплосодержания Мирового океана в течение 1955–2009 гг. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. № 1. С. 32–39
2. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик. Мурманск: ПИНРО, 2003. 164 с.
3. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Глок Н.И. О возможных изменениях стерической компоненты уровня Мирового океана // *Известия РГО*. 2010. Т. 142. Вып.4. С. 2–32.

4. *Domingues C.M., Church J.A., White N.J., Gleckler P.J., Wijffels S.E., Barker P.M., Dunn J.R.* Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise // *Nature*. 2008. Vol. 453. P. 1090–1093. DOI:10.1038 / nature07080.
5. *Gouretski V., Reseghetti F.* On depth and temperature biases in bathythermograph data: Development of a new corrections scheme based on analysis of a global ocean database // *Deep-Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2010. Vol. 57. No. 6. P. 812–833. DOI 10.1016/j.dsr.2010.03.011.
6. *Ishii M., Kimoto M., Sakamoto K., Iwasaki S.I.* Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses // *Journal of Oceanography*. 2006. Vol. 62. No. 2. P. 155–170. DOI 10.1007/s10872-006-0041-y.
7. *Ishii M., Kimoto M.* Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections // *Journal of Oceanography*. 2009. Vol. 65. No. 3. P. 287–299. DOI 10.1007/s10872-009-0027-7.
8. *Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P.* Warming of the world ocean, 1955–2003 // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32. No. 2. L02604. DOI 10.1029/2004GL021592.
9. *Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Baranova O.K., Garcia H.E., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Reagan J.R., Seidov D., Yarosh E.S., Zweng M.M.* World ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010 // *Geophysical Res. Letters*. 2012. Vol. 39. No. 10. DOI: 10.1029/2012GL051106.
10. *Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlax M.G.* Daily IPCC 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change/ Eds. Solomon S., Qin D., Manning M. et al.* New York: Cambridge University Press, 2007. 940 p.
11. *Wijffels S.E., Willis J.K., Domingues C., Barker P., White N., Gronell A., Ridgway K., Church J.* Changing expendable Bathy Thermograph fall-rates and their impact on estimates of thermosteric sea level rise // *Journal of Climate*. 2008. Vol. 21. No. 21. P. 5657–5672. doi:10.1175/2008JCLI2290.1

On estimation of the World Ocean Heat Content based on satellite sea surface temperature data

V.N. Malinin, S.M. Gordeeva, N.I. Glock

Russian State Hydrometeorological University (RSHU)

Saint-Petersburg, Russia

E-mails: malinin@rshu.ru, gordeeva@rshu.ru

The paper discusses the interannual variability of the World Ocean Heat Content (WOHC) since the middle of the 20th century until now. The mean trend of WOHC amounts to 0.22×10^{22} J per year and describes 75% of the initial variance. Based on reanalysis and satellite data on sea surface temperature the fine-resolution statistical models describing WOHC variations are constructed. A certain stabilization of WOHC fluctuations was shown since 2008.

Keywords: ocean heat content, sea surface temperature, statistical models, ocean cooling.